



Fons Smolders, onderzoekcentrum B-WARE / Radboud Universiteit Nijmegen

Tom van de Broek, Royal Haskoning

Esther Lucassen, onderzoekcentrum B-WARE / Radboud Universiteit Nijmegen

Bas Spanjers, Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden

# Monitoring proefsloten Lopikerwaard: hoe werkt een boerensloot in het veenweidegebied?

**In de Lopikerwaard, en dan met name in de polder Keulevaart, meet het Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden hoge concentraties nutriënten: de norm voor totaal-fosfor wordt op sommige meetpunten tot vijf maal overschreden. In 2010 begon het hoogheemraadschap, samen met de Provincie Utrecht en LTO, het project 'Waterkwaliteit op waarde geschat, Lopikerwaard'. Daarin zoeken de partijen ontwikkelingsperspectieven voor een duurzame landbouw in relatie tot een betere waterkwaliteit. Het uiteindelijke doel is het uitvoeren van maatregelen om de waterkwaliteit te verbeteren. Dit artikel gaat over een deelonderzoek dat als doel had meer inzicht te krijgen in de processen die de oppervlaktewaterkwaliteit bepalen in het veenweidegebied. Uit opgestelde fosforbalansen blijkt dat voor een drietal gemonitorde sloten de fosforrijkdom van de waterlaag niet wordt bepaald door de netto influx van fosfor. De fosforconcentratie van de waterlaag lijkt vooral bepaald te worden door interacties tussen ijzer, zwavel en fosfor in het watersysteem.**

Voor de drie proefsloten in de Keulevaart werd gedurende een jaar (1 april 2010 t/m 31 maart 2011) een monitoring uitgevoerd van de kwaliteit van het oppervlaktewater, het poriewater van de onderwaterbodem, het ondiepe grondwater van de omringende percelen en het regenwater<sup>1)</sup>. Daarnaast werden grondwaterstanden in de omringende percelen, de waterstanden in de sloot en de neerslaghoeveelheden gemonitord. Uitgangspunt voor de keuze van de sloten was dat deze representatief moesten zijn voor de gebruiksvormen die voorkomen in de Lopikerwaard. Daarom is gekozen voor extensief beheerd grasland met onderbemaling (sloot 1), intensief beheerd grasland met polderpeil (sloot 2) en extensief beheerd grasland met polderpeil (sloot 3). Met behulp van de gemeten parameters werd een waterbalans opgesteld en een balansstudie uitgevoerd voor fosfor, waarbij de balansposten zijn gekwantificeerd.

Sloot 1 en 2 werden gekenmerkt door een rijke waterplantenvegetatie, waarbij voornamelijk soorten die karakteristiek zijn voor harde en eutrofe wateren werden aangehouden, zoals smalle waterpest, stomphoekig sterrenkroos, schedefonteinkruid, aarvederkruid, kikkerbeet en gedoond hoornblad. Daarnaast kwamen ook niet wortelende waterplanten voor zoals puntkroos, bultkroos, klein kroos, veelwortelig kroos en grote kroosvaren. Behalve een behoorlijk aantal soorten waterplanten werden ook vissen, exotische zoetwaterkreeften en amfibieën aangetroffen. Sloot 3 was erg arm aan wortelende waterplanten en werd, vanaf het voorjaar, gedomineerd door draadwieren. De afwezigheid van wortelende waterplanten op deze locatie kan worden toegeschreven aan hoge sulfideconcentraties in de onderwaterbodem. Sulfide is voor de meeste waterplanten zeer giftig; het leidt tot wortelsterfte. Daarnaast remde ook de concurrentie met de draadalg de ontwik-

keling van een ondergedoken waterplantenvegetatie.

## Fosforfluxen

Afbeelding 1 toont de totale jaarfluxen voor fosfor voor de drie sloten en de gemiddelde fosforconcentraties in het water en het poriewater, evenals de totale fosforvoorraad in de bodem (bovenste halve meter) en de waterplantenbiomassa (vegetatie). Alle concentraties en fluxen zijn omgerekend naar vierkante meter slootoppervlak. We zien dat in sloot 1 en 2 veel fosfor binnenkomt met het freatische grondwater (veenwater). Afstroming en inlaat zijn kwantitatief veel minder belangrijk. Dit toestromende grondwater is echter niet alleen rijk aan fosfor maar nog veel rijker aan ijzer (zie tabel). Bij het uittreden van dit grondwater oxideert het ijzer, waardoor het met fosfaat neerslaat en precipiteert in de waterbodem. Een groot deel van het fosfor komt dus in de waterbodem terecht en niet in de waterlaag. Verlies van fosfor uit de sloten vindt vooral

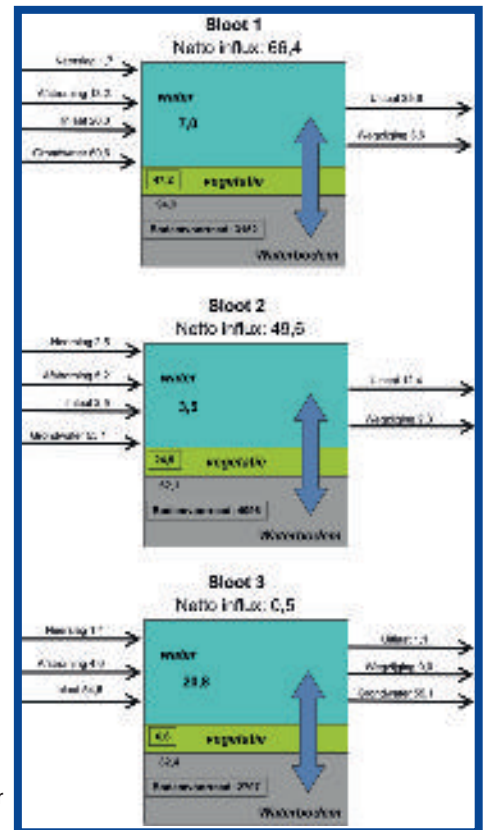
plaats via uitlaat, maar deze post is veel minder groot dan de influx. Dit alles resulteert voor sloot 1 en 2 in een netto influx van respectievelijk 66 en 50 mmol m<sup>2</sup> per jaar. De gemiddelde fosforvoorraad in de waterlaag is, gelet op de netto influx van fosfor, relatief laag. Er hoopt zich dus netto fosfor op in de sloten, met name in de bodems. Een deel wordt ook opgenomen door de vegetatie. In de waterplantenbiomassa vinden we een aanzienlijke fosforvoorraad van respectievelijk 47 en 25 mmol m<sup>2</sup>. De wortelende waterplanten zullen echter ook een aanzienlijk deel van het fosfor opnemen uit de waterbodem. Vergeleken met de totale fosforvoorraad in de bovenste 50 cm van de onderwaterbodem is de netto influx van fosfor echter gering (twee procent voor sloot 1 en nog lager voor de overige sloten) (zie afbeelding 1).

Voor sloot 3 is de situatie totaal anders. Daar vormt de inlaat van oppervlaktewater de belangrijkste influx van fosfor. Netto treedt geen grondwater uit in de sloot. Verlies via zijginging naar het freatische grondwater vormt de belangrijkste verliespost. Uiteindelijk is de netto influx vrijwel nihil (0,5 mmol m<sup>2</sup> per jaar), maar de fosforconcentratie van de waterlaag juist het hoogste (zie tabel). We hebben hier met een doorstroomsysteem te maken. Het gebied ligt duidelijk hoger dan de omgeving, waardoor netto grote waterverliezen optreden die worden gecompenseerd door inlaat van relatief fosfaatrijk en ijzerarm inlaatwater. De fosforconcentratie in de vegetatie is relatief laag (6,6 mmol m<sup>2</sup>). Dit heeft te maken met het feit dat, mede door de hoge sulfideconcentraties in het poriewater, nauwelijks wortelende waterplanten kunnen groeien op deze locatie.

### Interacties tussen ijzer, zwavel en fosfor

Het onderzoeksgebied wordt gekenmerkt door kleiige veenbodems. Deze organische

bodems bevatten veel zwavel in de vorm van zowel organisch zwavel als gereduceerde zwavelverbindingen, waaronder sulfide. Dit gereduceerde zwavel is in de waterverzadigde diepere delen van de bodems stabiel en precipiteert met gereduceerd ijzer als ijzersulfides. Hierdoor wordt het gereduceerde zwavel geïmmobiliseerd in de natte anaerobe bodems. Bij lage grondwaterstanden bereikt zuurstof de toplaag van het anaerobe veen en oxideert hier het organische materiaal. Hierbij wordt het organische materiaal deels omgezet in kooldioxide. Het zwavel uit de bodems komt na oxidatie vrij als sulfaat. Dit sulfaat is zeer mobiel en kan gemakkelijk uitspoelen uit de bodem naar het oppervlaktewater. Verder komen bij de afbraak van het organische materiaal ook nutriënten vrij, met name in de vorm van fosfor en ammonium. In sloot 1 zakte, vanwege de onderbemaling die hier plaatsvindt, het grondwater tot zo'n 30 cm dieper uit dan in sloot 2 en 3 (polderpeil). In sloot 1 werden in het grond- en oppervlaktewater ook veel hogere sulfaatconcentraties gemeten dan op de overige locaties (zie tabel). Zeer waarschijnlijk is de versterkte oxidatie van de bodem, als gevolg van de lagere waterstanden, hiervan de oorzaak. De verhouding tussen opgelost ijzer en fosfor in het poriewater van de waterbodem is bepalend voor de nalevering van fosfor aan de waterlaag. Voldoende hoge ijzerconcentraties in het poriewater beperken, zolang de waterlaag voldoende zuurstof bevat, de nalevering van fosfaat naar de waterlaag. Relatief goed oplosbaar gereduceerd ijzer (Fe<sup>2+</sup>) wordt in het geoxideerde toplaagje van het sediment geoxideerd tot slecht oplosbaar Fe<sup>3+</sup>. Dit kan samen met fosfaat neerslaan als ijzer(III)fosfaat. Dit proces heet de 'ijzerval'. Zolang dus voldoende gereduceerd ijzer in het poriewater in oplossing is en de waterlaag voldoende zuurstof bevat, zal de nalevering van fosfaat naar de waterlaag beperkt zijn.



Afb. 1: Balansposten voor fosfor. Tevens worden de gemiddelde concentraties in het water en het poriewater gegeven, alsmede de totale fosfaatvoorraad in de bodem (bovenste halve meter) en de waterplantenbiomassa (vegetatie). De waarden worden gegeven in mmol m<sup>2</sup> per jaar. De netto influx is het verschil tussen de binnenkomende posten en de uitgaande posten.

Sulfaat dat via inlaatwater of via afspoeling uit de percelen in de sloot komt, kan de ijzer/fosforbinding echter verstoren. In de anaerobe onderwaterbodems wordt sulfaat gereduceerd tot sulfide, dat vervolgens reageert met aanwezige ijzercomplexen waarbij slecht oplosbare ijzersulfiden worden gevormd<sup>2)</sup>. Op deze wijze kan uiteindelijk een groot deel van het in de bodem aanwezige ijzer worden vastgelegd. Een goede maat voor de mate waarin dit gebeurt, is de verhouding tussen ijzer en zwavel van de waterbodem. Door de vastlegging van ijzer daalt de ijzerconcentratie van het poriewater en kan de nalevering van fosfaat naar de waterlaag toenemen, afhankelijk van de fosfaatconcentratie van het poriewater. Uit de tabel blijkt dat de fosforconcentratie van het poriewater niet sterk verschilt tussen de drie sloten. Wel treden grote verschillen op in de ijzerconcentratie van het poriewater. In sloot 3 is vrijwel geen vrij ijzer meer aanwezig in de onderwaterbodem en de sulfideconcentratie van het poriewater is hoog. In deze sloot wordt sulfaatrijk en tevens ijzerarm oppervlaktewater ingelaten om verdroging te voorkomen. Dit heeft ertoe geleid dat alle ijzer gebonden is aan gereduceerd zwavel, waardoor de nalevering van fosfaat naar de waterlaag hier fors is. Met name voor sloot 1 is de sulfaatbelasting ook erg hoog. Deze belasting vindt hier plaats via het toestromende grondwater. Op deze locatie is het grondwater erg rijk aan sulfaat (3.700 µmol/l)

### Gemiddelde eigenschappen van het grondwater, het poriewater, de waterbodem en de bodem van de drie onderzoekssloten.

	sloot 1	sloot 2	sloot 3	opmerking
<b>freatische grondwater</b>				
sulfaat (µmol/l)	3.709	1.218	1.661	jaargemiddelde
ijzer (µmol/l)	114	93	28	jaargemiddelde
fosfor	51	27	23	jaargemiddelde
toestroom grondwater	ja	ja	nee	
<b>waterbodem</b>				
ijzer/zwavel (mol/mol)	0,60	1,13	0,43	toplaag: 0-20 cm
fosfor (mmol/kg)	35,0	36,2	31,6	toplaag: 0-20 cm
<b>poriewater</b>				
<b>onderwaterbodem</b>				
ijzer (µmol/l)	107	503	1	jaargemiddelde
sulfide (µmol/l)	<1	<1	438	meting in juli 2011
fosfor (µmol/l)	188	124	165	jaargemiddelde
ijzer/fosfor (mol/mol)	0,57	5,05	0,01	jaargemiddelde
<b>oppervlaktewater</b>				
sulfaat (µmol/l)	2.464	550	1.130	jaargemiddelde
fosfor (µmol/l)	7,0	3,1	20,1	jaargemiddelde

als gevolg van de oxidatie van veen door de onderbemaling.

De ijzerconcentratie van het poriewater van de waterbodem is in deze sloot echter nog niet uitgeput. Mogelijk komt dit omdat hier ook ijzer toestroomt via het grondwater. Wel zien we in sloot 1 dat de verhouding tussen ijzer en zwavel van de onderwaterbodem al zeer ongunstig is, net als de verhouding tussen opgelost ijzer en fosfor van het poriewater. Dit resulteert in een hogere gemiddelde fosforconcentratie in de waterlaag dan op sloot 2, waar de verhouding tussen ijzer en zwavel van de onderwaterbodem veel gunstiger is.

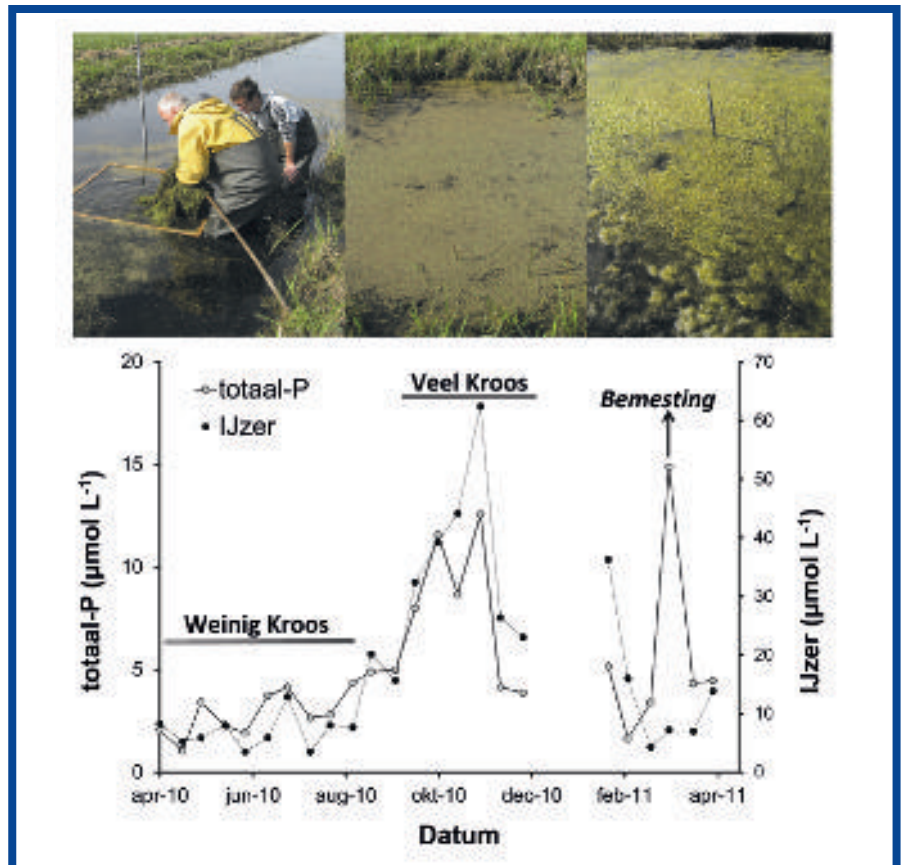
### Kroosdek als gevolg van zuurstofloze waterlaag

Het ijzer in het poriewater kan niet altijd voorkomen dat fosfor wordt nageleverd naar de waterlaag. Voorwaarde voor de werking van de ijzerval is namelijk de aanwezigheid van voldoende zuurstof in de waterlaag. Wanneer de waterlaag zuurstofarm wordt, kan het fosfaat samen met het ijzer naar de waterlaag diffunderen. Dit gebeurt met name aan het einde van de zomer wanneer het warm is en er veel reactief organisch materiaal (met name dode algen en plantenresten) aanwezig is. De hoge microbiële activiteit kan er dan, samen met het feit dat in warmer water minder zuurstof kan oplossen, voor zorgen dat de zuurstofconcentratie van de waterlaag sterk daalt. Vaak zien we dan dat zich in de nazomer of het najaar een kroosdek ontwikkelt in dit soort sloten (zie afbeelding 2)<sup>3)</sup>. Het kroos kan profiteren van de verhoogde beschikbaarheid van fosfor in de waterlaag. Wanneer zich eenmaal een kroosdek heeft ontwikkeld, blijft de waterlaag zuurstofarm, omdat kroos zuurstof afgeeft aan de atmosfeer en niet aan de waterlaag. Tevens belemmert kroos de diffusie van zuurstof uit de atmosfeer naar het water. In afbeelding 2 wordt dit geïllustreerd aan de hand van de situatie in sloot 2 uit de Lopikerwaard. In deze sloot daalt vanaf eind augustus de zuurstofconcentratie, waardoor ijzer en fosfor in de waterlaag ophopen. Vanaf dat moment wordt de sloot gedomineerd door een kroosdek. In de winter zien we in februari (zie afbeelding 2) een piek van de fosforconcentratie van het oppervlaktewater. De ijzerconcentratie blijft laag. Deze piek wordt veroorzaakt door (oppervlakkige) afspoeling van mest uit het recent bemeste weiland.

### Conclusies

Niet de absolute fosforbelasting (influx) van het watersysteem maar met name de interactie met het ijzer en zwavel in de waterbodems is bepalend voor de beschikbaarheid van fosfor in de waterlaag. We zien dat de sloten van de locaties 1 en 2 ondanks de relatief hoge netto influx van fosfor toch de beste waterkwaliteit vertonen. Weliswaar gaat het nog steeds om zeer eutrofe sloten die gedomineerd worden door voor voedselrijk water karakteristieke soorten. Toch zijn de sloten gezien de omstandigheden redelijk biodivers.

De resultaten indiceren dat het van belang



Afb. 2: Verloop van de fosfor- en ijzerconcentratie in een eutrofe boerensloot (locatie 2) uit de Lopikerwaard. Vanaf eind augustus werd de sloot bedekt door een kroosdek. In februari werd een fosforpiek gemeten die werd veroorzaakt door afspoeling van mest van het perceel. De foto's van links naar rechts laten de bemonstering van waterplanten zien, het kroosdek op sloot 2 en draadwieren op sloot 3.

is dat de influx van fosfor naar deze sloten plaatsvindt via toestromend freatisch grondwater, zodat behalve fosfaat ook ijzer toestroomt naar de sloten. Hierdoor slaat het via dit grondwater aangevoerde fosfor grotendeels neer en hoopt het in eerste instantie op in de waterbodem. De belangrijkste bronnen van het fosfaat vormen de oxidatie van veen en de uitspoeling van fosfor uit de bemeste toplaag van de bodem. Onderbemaling leidt tot een versterkte oxidatie van veen en hierdoor tot hogere sulfaat- en fosforconcentraties in het freatische grondwater. Op locatie 1 en 2 wordt behalve sulfaat ook ijzer aangevoerd via het grondwater. Hierdoor worden de effecten van de sulfaatbelasting via het grondwater enigszins gemitigeerd. Aanvoer van sulfaat via het oppervlaktewater, zoals in sloot 3, is het meest ongunstig omdat oppervlaktewater arm is aan opgelost ijzer.

Belasting van organische onderwaterbodems met sulfaat leidt tot een verlaging van de ijzer/zwavel-ratio van deze bodems en een afname van de ijzer/fosfor-ratio van het poriewater van de waterbodem. Als gevolg hiervan neemt de nalevering van fosfor naar de waterlaag toe. Wanneer de ijzerconcentratie in het poriewater erg laag wordt, kan giftig sulfide ophopen. Hoge sulfideconcentraties en een eutrofe waterlaag voorkomen de ontwikkeling van ondergedoken wortelende waterplanten en resulteren in een lage biodiversiteit. Afvoer van voedingstoffen uit de sloot-systemen is mogelijk door het plegen van

goed slootonderhoud. Door het schonen van de sloten kunnen aanzienlijke hoeveelheden nutriënten worden afgevoerd. In het geval van de sloten 1 en 2 bedraagt dit naar schatting 50 tot 70 procent van de jaarlijkse netto influx van fosfor. Verwijderen van 90 procent van de waterplantenbiomassa laat voldoende materiaal achter om in het voorjaar een snelle hergroei van waterplanten mogelijk te maken.

Mogelijke maatregelen om de waterkwaliteit van de boerensloten in het onderzoeksgebied te verbeteren bestaan uit het terugdringen van het aantal onderbemalingen en het streven naar een evenwichtsbemesting. Eventueel kan gedacht worden aan het beijzeren van sloten (bijvoorbeeld met ijzerrijk slib van drinkwaterwinningen). Ook het toepassen van onderwaterdrainage zou een gunstig effect kunnen hebben, omdat de oxidatie van het veen minder snel gaat.

### LITERATUUR

- 1) Smolders F., T. van den Broek, E. Lucassen, M. van der Welle en W. Zaadnoordijk (2011). Monitoring proefsloten Lopikerwaard. Onderzoekcentrum B-WARE en Royal Haskonig. Rapport 2011-30.
- 2) Smolders F., L. Lamers, E. Lucassen, G. van der Velde en J. Roelofs (2006). Internal eutrophication: How it works and what to do about it, a review. *Chemistry and Ecology* 22, pag. 93-111.
- 3) Boedeltje G., F. Smolders, L. Lamers en J. Roelofs (2005). Interactions between sediment propagule banks and sediment nutrient fluxes explain floating plant dominance in stagnant shallow waters. *Archiv für Hydrobiologie* 162, pag. 349-362.